

固体レーザー高調派による ガラス基板の内部マーキング

林 健一 *

Inner Glass Marking by Harmonics of Solid State Laser

Ken-ichi Hayashi

Inner marking was demonstrated with the use of harmonics of solid-state laser. LD-pumped Nd:YLF laser was employed to obtain the SHG and FHG pulses. When the laser beam was strongly focused inside the transparent material, the phenomena of "optical damage" or "optical breakdown" appeared inside the material. Thin glass plate less than 1 mm was processed, and well controlled optical damage made it possible to obtain the inner marking without any surface damages. Inner glass marking is suitable for the clean industrial marking process.

Keywords: Glass, Marking, Optical Damage, Optical Breakdown, Inner Marking

1. はじめに

ガラスは可視域で透明な光学材料であり、マクロ的には均質で硬く電気絶縁性にも優れているが、熱や力の衝撃に脆く、研磨や曲げ以外の機械加工性に乏しい。現在、ガラスのレーザー加工としては、主としてマーキングが行われている。CO₂ レーザー(波長 10.6 μ m)で表面を熔融させたり、ArF エキシマレーザー(波長 193nm)によるアブレーションで表面に窪みを形成している[1,2,3]。CO₂ レーザーの加工速度は速いが、熱影響により表面に割れが発生する。ArF エキシマレーザーでは極めて平滑な加工面が得られるが、加工時の飛散物が表面に再付着するデブリの発生という問題を生じる。このため、特殊な用途を除いて産業用に用いられてはいない。

ガラスは透明材料であり、材料内部にマーキング出来ればデブリの発生という問題は完全に解消出来る。そこで、ガラスの内部にレーザービームを強く集光させることで内部マーキングを試みた。レーザービームをレンズなどで強く集光させると電界強度が高くなり、レンズ等の光学材料中では、非線形吸収によって"Optical Damage",あるいは,"Optical Breakdown"と呼ばれる現象が発生することが知られている。光学的損傷は吸収されたレーザーエネルギーによって内部に熱ひずみを誘起させ、クラックを生成するものと考えられるが、光学部品等の寿命を短くする有害な現象として、これまで利用されずにいた。透明材料内部でのクラック生成は、非線形現象で、レーザー光強度に対する破壊の閾値を持つ。これを1mm以下の薄いガラ

* 住友重機械工業株式会社 総合技術研究所 (〒254-0806 平塚市夕陽ヶ丘 63-30)
R&D Center, Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

ス基板に適用するには、いくつかの課題がある。それは、表面あるいは裏面の損傷を避けて内部だけにクラックを生成する条件を見出すことや内部に生成したマークの視認性を上げて機械で自動読み取り出来るようにすることなどである。透明な光学材料では、材料の裏面、表面、内部の順で大きな閾値になる。これは、材料表面では微細な凹凸、キズの存在、不純物の吸着などで光エネルギーの吸収がより起こりやすいことによる。このため、内部だけにクラックを生じさせるには表面より内部で強く集光する必要がある。これを Fig.1 に示す。

以下には、筆者らが開発した全固体レーザー高調波を用いた加工システム[4]と、各種ガラス基板内部にマーキング加工した応用例について述べる。

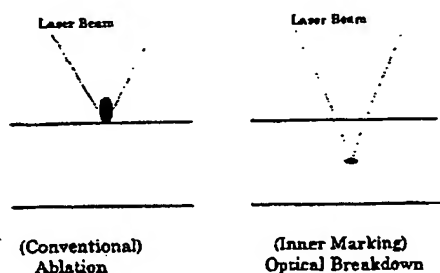


Fig. 1 Ablation and optical damage

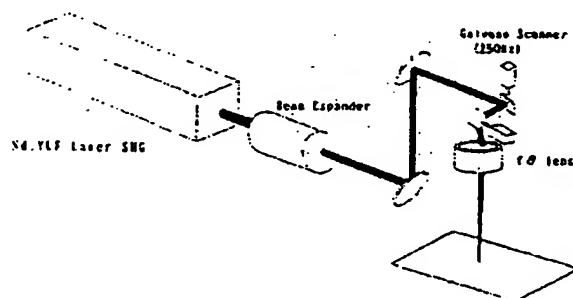


Fig. 2 Laser marking system

2. 装置および実験方法

装置の基本構成を Fig.2 に示す。レーザー光源は、半導体レーザー励起 Nd:YLF レーザーを基本波に用いているが、直線偏光で $M^2=1.05$ というビーム品質の良い基本波(1047nm)が得られている。基本波を波長変換用非線形結晶により可視または紫外光に変換する。非線形結晶として BBO(β -BaB₂O₄)を1個用いて第2高調波(523nm)に変換し、さらに1個用いて第4高調波(262nm)を発生させる。第2高調波と第4高調波の出力エネルギーは、それぞれ、パルスあたり約 0.3mJ、約 40 μ J で、パルス幅は半値全幅で約 15 ns である。

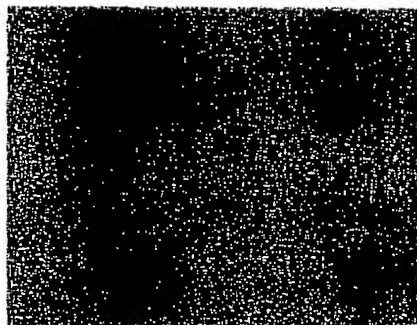
伝送光学系では、まず波長選択を行う。レーザー出射口の直後にビームエキスパンダを置き、ビームを拡大し、ついで、2枚の誘電体多層膜ミラーで波長選択を行い、目的の高調波光だけを取り出す。これは、より低次の光によってガラス内部に光学的損傷が生じるのを防ぐためである。スキャニングにはガルバノミラーと $f\theta$ レンズの組合せを採用している。ガルバノミラーはXYの2方向を、レーザー繰り返し周波数に近い 250Hz の高速で走査する。 $f\theta$ レンズは合成石英の焦点距離が 50mm あるいは 150mm のものを用いた。また、スキャニングにはXYステージと通常のレンズの組合せも使用でき、レーザービームは各種の集光レンズによりXYステージ上のガラスに集光される。

ソーダ石灰ガラスは日本板硝子製の 0.7, 1.1, 3.4mm 厚の3種類、無アルカリガラスはNHテクノグラス製 NA-35 の 0.7mm 厚を使用した。また、UV グレードの 10mm 厚の合成石英基板やレンズ材料の BK7 および顕微鏡スライドガラス(池田理化 S1112 1.1mm 厚)を用いた。

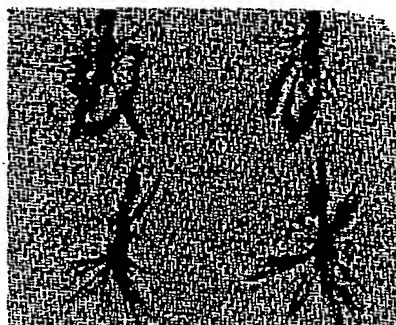
3. 試験結果

3.1 各種ガラス基板の内部マーキング

レーザービームに対して透明な材料であれば加工が出来て、合成石英ガラスでは Nd:YLF レーザーの第4または第5高調波が、可視域で透明なガラスでは基本波や第2高調波が使用出来る[5]。Fig.3 に内部マーキングの結果を示す。マークは Fig.4 に示すように微細なクラックの集まりであり、ガラス基板の強度劣化を防ぐには、クラックの大きさを制御する必要がある。



(a) Fused silica
Fig.3 Inner marking



(b) Soda lime glass



(a) Non-alkali glass
Fig.4 Cracks of inner marking.



(b) Soda lime glass

3.2 パルスエネルギーによるサイズの制御

ソーダ石灰ガラスの場合には、Fig.5 に示すように、レーザーのパルスエネルギーを増加させると、まず、屈折率変化の領域が現れ、ついでクラックが生成し、さらにクラックの中心から割れの数の増大が認められた。無アルカリガラスでは屈折率変化の発生確率はソーダ石灰ガラスより大きい、屈折率変化の部分は、約1週間後には全てクラックに移行した。BK-7 では、屈折率変化だけの生じることはなく、ある閾値以上では全てクラックが生成した。



Fig.5 Refractive index change and crack formation

レーザーのパルスエネルギーを変えることで、クラックの大きさ(X, Y, Z方向)が制御出来ると期待されたが、パルスエネルギーによる大きさの制御は困難であった。パルスエネルギーを大きくすると、定性的にはクラックが大きくなる傾向が認められたが、中心から割れていく割れの数も増加するなど、複雑な形状変化を示した。

3.3 ドット密度

マークの数を増加させれば、視認性を向上出来る。

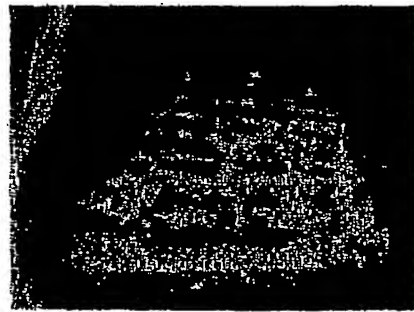
垂直方向の増加については、照射位置をZ方向にも移動させる必要が生じると考えられるが実際には位置を変えず、次の照射を行うと、前のクラックの上に新しいクラックが形成される。この場合散乱強度は照射回数と共に増加するが、クラック同士が重なって形成されるため、比例的には増大しない。また、ガラス基板の厚さの制限があるため、照射回数は制限される。

水平方向の増加については、XY方向に移動して照射を行うものである。1つのマークを複数のドットに分けて照射する。クラックとクラックとが干渉するとガラス基板の強度劣化につながる危険性があるので、ドット密度をある値以下で行う必要はあるが、照射の回数に比例して散乱強度を増加出来る。この方法の利点は、クラックの大きさを小さくして多くのドットによりマークを表現することで、精細な平面模様が描けることである。

ドット密度を高くしていくと、ドット間隔が狭くなり、合体するという現象が起こる。合体すると、クラックは個々の小さな点の集まりであったものが大きな割れの面を形成してしまう。この大きな割れの面は強度劣化を引き起こす。また、ドット間隔が狭くなると、後から照射したドットの位置はレーザー光の入射方向に移動する。すなわち、マークが平面ではなく、密度の高い部分が浮き出してくるという現象が生じる。ある程度厚みのある基板では問題とならないが、薄い基板の場合は直ちに表面が損傷する。これを、Fig.6に示す。



(a) Low dot density



(b) High dot density

Fig.6 Cracks of inner marking.

3.4 形状の制御

まず、N.A.(Numerical Aperture)を変えるとクラック長さ(Z方向のクラックの大きさ)が制御出来る。焦点距離を $f=50\text{mm}$ から $f=200\text{mm}$ まで、 50mm おきに長くすると、クラックの大きさは増加したが、 $f=200\text{mm}$ では表面あるいは裏面が損傷を受けることはあっても内部にクラックを形成することは出来なかった。

次に、アナモルフィック光学系によりレーザービームの断面形状を円形から楕円に変えて、クラックの生成される方向を制御した。まず、プリズムでビームを横方向に拡大した。これをレンズで集光するとX方向、Y方向でN.A.が異なるため、N.A.の小さな方向にクラックが揃って生じる。

これを照明すると、Fig.7のように、クラックの生成方向ではほとんど散乱は生じないが、垂直方向で散乱強度は最大となる。生成方向が光学系にのみ依存し、材料の不均一性に起因しないことは、ガラス基板を回転させてマーキングしてもクラック生成方向が変わらないことにより確認した。



(a) Perpendicular illumination to the crack (b) Parallel illumination to the crack
Fig.7 Cracks of inner marking.

3.5 角度の制御

クラック生成方向は制御出来てもZ方向に平行な面内では、視認性は向上しない。そこで、Z方向に対してクラック生成方向を傾けた。入射光に対してガラス基板を約 45° 傾けると、Fig.8の結果が得られた。中心部にレーザー光の集光部が軸状に走り、その両側にクラックが広がり、蝶の様に見えるので"butterfly mark"と呼んでいる。



(a) Perpendicular illumination to the crack (b) Parallel illumination to the crack
Fig.8 Cracks of inner marking.

このクラックの特長は、Z方向に対して傾けてあり方向性が制御出来るため、隣接するマークとの合体が避けられることである。また、クラックの主軸方向が表面と垂直ではないため、等価的に厚いガラス基板と見なせて、表面に損傷を与えず長い(大きい)マークを生成出来る。したがって視認性もあげることが出来る。

一方、ガラス基板へのエネルギー入射効率が一般的には低下するが、p偏光をブリュースター角付近で用いれば損失を避けることが出来る。また、ガラス基板が光軸に対して傾いて置かれるため、実際には、1軸はガルバノミラーまたはポリゴンミラーで高速スキャンし、もう1軸(傾けた軸)はステージ駆動などの低速スキャンと組み合わせて使う必要がある。

4. 考察

各種ガラス基板の内部マーキング実験結果をもとに、これを工業的に利用する場合の問題点について考察する。

4.1 レーザー出力

内部マーキングの特長は、表面に損傷を与えずに、内部に明瞭なマークを得ることである。このためには、表面の損傷閾値より低く、かつ、内部損傷閾値より高いエネルギー密度が要求される。この背反する条件を満足させる方法として光学系のN.A.を高く取ると共に、レーザ

ービームの品質を高くすることが有効であると考えられる。この点で、高ビーム品質の全固体レーザー高調波は光源として適したものと言える。また、実用上の観点から、ガラス基板の表面清浄度の高いもの程、表面の損傷閾値が高くなるので、クリーンなプロセスにおいて採用されるのが望ましい。実際のガラス基板へのマーキングは、たとえば $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ のサイズに $50\text{ }\mu\text{m}$ 間隔で ID マトリックスを作っていく。 20×20 のマトリックス内に 300 個のドットを打つとすれば、必要なエネルギーは $0.3\text{ mJ/dot} \times 300 = 90\text{ mJ}$ である。 300Hz で照射すれば、毎秒 1 基板を処理できる計算になる。このとき必要なレーザー出力は 90mW である。出力の大きなレーザーを用いて高速スキャニングをすれば、さらに高スループットが実現できる。

4.2 今後の課題

クラックの制御により表面や裏面を損傷することなく、厚さ 0.7 mm のガラス基板内部にマーキングが可能であり、機械による自動読み取りが実現された。これによるマークの種類としては、通常のグラフィックドットパターン、文字、2次元の ID マトリックスなどがあげられる。これらのうち、ID マトリックスが最も高密度のドットパターンとなるので、素材メーカーの協力を得て、内部マーキングにより 0.7mm 厚のガラス基板が強度変化を生じるかどうかを検討している。これまでのところ、曲げ試験、熱衝撃試験(高温側、低温側)では著しい強度劣化は認められていない。ガラス基板は現在、厚さ 1.1mm から 0.7mm のものが主流となっている。さらには、 0.4mm のガラス基板にマーキングが要求されると予想され、今回のような特定方向だけに割れるクラックや "butterfly mark" が使われることになる可能性がある。この場合には、さらに詳細な強度評価が必要と考えられる。また、フェムト秒を用いる屈折率変化のマーキングも必要になるかも知れない[6]。屈折率変化はマークとしては細長い筋状のマークとなるため、視認性はそれほど望めず、特殊な照明下での顕微鏡読み取りが必要となる。このため、むしろ、隠しマークのような使用法になると予想される。

5. まとめ

全固体レーザー高調波を光源とし、ガラスを透過する波長のレーザービームをガラス基板内部に強く集光し、光学損傷により内部マーキングを行った結果を示した。

- (1) Nd:YLF 第 4 高調波(262nm)で合成石英基板の内部にマーキングを行い、表面にクラックのないマーキングを実証した。
- (2) 第 2 高調波を用いて 0.7mm 厚のガラス基板内部に ID マトリックスをマーキングし、機械読み取りを可能にした。
- (3) ビームの形状をアナモルフィック光学系で変えることにより、特定方向にのみクラックを生成することが可能になった。
- (4) 基板に対して斜入射させることで、相対的に大きなクラックを基板内部に生成出来て、視認性の良いマーキングが可能になった。
- (5) 今後、より薄い基板の内部マーキングでは、強度劣化のないことなどの検討が必要である。

参考文献

- 1) B.Braren and R.Srinivasan: J.Vac.Sci.Technol. B6(2),537,(1988).
- 2) 石坂進一: ジョイテック, 8, 34, (1992).
- 3) 山中康弘, 加幡博史: 機械と工具, 37, 18, (1993).
- 4) 酒井文雄, 林健一: 住友重機械技報, 44, 29, (1996).
- 5) 林健一, 酒井文雄: 第 4 回機械材料・材料加工技術講演会論文集, 61, (1996).
- 6) 林健一, 古谷祥雄, 遠間正真, 伊東一良: 第 45 回応用物理学関係連合講演会, 28aW1, (1998).